

Investigation the Impact of Climate Change on the Aridity in Iran with Population Exposure Approach

Hadi Ramezani Etedali ^{1*}, **Sakine Koohi** ²

1. Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.
2. PhD student of water resources engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

Corresponding Author: Ramezani@eng.ikiu.ac.ir

Introduction

Aridity and desertification, as key consequences of climate change driven by reduced precipitation and rising temperatures, have emerged as significant environmental challenges, particularly in arid and semi-arid regions. Given Iran's geographical characteristics, aridity is an inherent feature of the country. This phenomenon impacts various sectors, including agriculture, industry, public health, and population dynamics, exacerbating vulnerabilities across society. Despite its profound implications for human life, a comprehensive understanding of the population distribution and exposure to varying drought intensities remains lacking, particularly in Iran. Considering that a substantial portion of Iran lies within arid and semi-arid zones, coupled with predictions of future population growth and increasing stress on natural resources, there is an urgent need for systematic research. Such studies should aim to quantify and assess the population affected by different levels of aridity intensity across the country. This research primarily seeks to determine the number of people likely to be impacted in various regions and to evaluate the severity of their exposure to drought.

Materials and Methods

This study was conducted across Iran, utilizing data from 31 synoptic stations distributed throughout the country's provinces. Monthly precipitation, average temperature, and maximum temperature data were analyzed. Downscaled climate data from the NEX-GDDP suite were employed, incorporating projections from five general circulation models (GCMs): CNRM-CM6-1, CanESM5, GFDL-ESM4, HadGEM3-GC31-LL, and MIROC6. These models were examined under two emission scenarios, SSP2-4.5 and SSP5-8.5. Precipitation and temperature data (average and maximum) were gathered for the baseline period of 2001–2014 and the future period of 2025–2036 using coding tools within the Google Earth Engine (GEE) platform. After calibrating the coefficients for each GCM during the baseline period, the outputs of the five models were combined. The error rates between the observed values and the baseline model outputs were individually assessed for precipitation, average temperature, and maximum temperature to ensure accuracy. The study utilized two widely recognized aridity indices for classifying regional climates: De Martonne's Aridity Index (DMI) and Erinç's Aridity Index (EAI). Additionally, population projections for the 31 provinces, based on data from Fathi (2020), were used to estimate the population distribution during the 2025–2036 period, serving as the baseline for future analyses.

Results and Discussion

The evaluation during the baseline period revealed that the climate projections from the Sixth Assessment Report on Climate Change accurately estimated atmospheric variables, including average and maximum air temperatures, for most provinces in Iran, with the exceptions of Khuzestan, Isfahan, and Hamedan. Analysis of changes in the DMI and EAI aridity indices indicates that, under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 climate scenarios for the 2025–2036 period, there is a noticeable decline in index values compared to the baseline period, signifying a shift toward drier and more arid climatic conditions at numerous monitoring stations. These climatic shifts are particularly pronounced in the central, southern, southeastern, eastern, and northwestern regions. An increase in aridity severity in the central, western, and eastern areas is likely to result in reduced water availability, diminished agricultural productivity, and consequently, more challenging living conditions. If this trend persists, it may lead to population migration from arid and semi-arid regions to areas with more favorable climatic conditions.

Furthermore, based on both DMI and EAI indices, projections under the SSP2-4.5 scenario suggest that the population exposed to arid and semi-arid climates in the southern, eastern, and northern parts of the country will rise compared to the baseline period. Similarly, under the SSP5-8.5 scenario, the population affected by arid and extremely arid conditions is expected to increase significantly relative to the baseline period.

Conclusion

With the population growth in arid and semi-arid regions, heightened pressure on natural resources and local ecosystems in these areas is an inevitable concern. This situation is likely to give rise to significant economic, social, and environmental challenges in the affected regions. Consequently, it is imperative for policymakers and natural resource managers to develop comprehensive strategies. These should focus on effective water resource management, promoting sustainable agricultural practices, and establishing the necessary infrastructure to adapt to climate change in vulnerable areas. Such measures are essential to mitigate the adverse effects of climate change and to prevent serious long-term problems.

Keywords: Aridity Index, Population, SSP Scenarios, CMIP6

بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر میزان خشکی در ایران با رویکرد مواجهه جمعیتی

هادی رضانی اعتدالی^{۱*}، سکینه کوهی^۲

۱. استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
۲. دانشجوی دکتری منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

نویسنده مسئول: Ramezani@eng.ikiu.ac.ir

چکیده:

خشکی و خشکسالی از پیامدهای مهم و تأثیرگذار تغییر اقلیم به‌شمار می‌رود. پایش و ارزیابی دقیق تغییرات در میزان مواجهه با خشکی می‌تواند به برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران در زمینه اتخاذ استراتژی‌های مدیریتی مناسب برای کاهش اثرات منفی و سازگاری با شرایط جدید کمک نماید. لذا پژوهش حاضر با هدف ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم بر میزان خشکی در ایران با رویکرد بررسی میزان جمعیت مواجهه با شدت‌های مختلفی خشکسالی تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به انجام رسیده است. برای این منظور از شاخص‌های خشکی Erinc's و De Martonne استفاده شده است. نتایج در دوره پایه نشان داد که خروجی اقلیمی حاصل از ادغام مدل‌های اقلیمی گزارش ششم از کارایی مناسبی در شبیه‌سازی تغییرات بارش، متوسط و بیشینه دما در سطح کشور برخوردار می‌باشد. علاوه بر این، بررسی شرایط اقلیمی در دوره پایه حاکی از آن است که براساس هر دو شاخص خشکی تمام استان‌های کشور به غیر از گیلان، مازندران و کهگیلویه و بویراحمد درگیر شرایط نیمه‌خشک تا خیلی خشک می‌باشند. علاوه بر این، بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر خشکی در سطح کشور تحت سناریوی SSP2-4.5 طی دوره ۲۰۲۵ تا ۲۰۳۶ حاکی از تغییر وضعیت اقلیمی در استان‌های واقع در محدوده شمال غرب، غرب و جنوب غرب به سمت خشک‌تر می‌باشد. همچنین نتایج تحت سناریو اقلیمی SSP5-8.5 حاکی از برقراری اقلیم خیلی خشک طی دوره آتی در بخش قابل توجهی از کشور در محدوده مرکز، جنوب تا شرق و شمال غرب می‌باشد. بررسی جمعیت تحت تأثیر شدت‌های مختلف خشکی بیانگر افزایش جمعیت تحت تأثیر شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک در مناطق جنوبی، شرقی، غربی و مرکزی کشور نسبت به دوره پایه می‌باشد. بنابراین نیاز به برنامه‌ریزی دقیق و هماهنگ برای مدیریت منابع طبیعی، توسعه زیرساخت‌ها و کنترل مهاجرت داخلی ضروری به نظر می‌رسد به طوری که بدون توجه به چنین برنامه‌ریزی‌هایی، ممکن است کشور با چالش‌های زیست‌محیطی و اجتماعی پیچیده تری روبه‌رو شود.

کلمات کلیدی: شاخص خشکی، جمعیت، سناریوهای SSP، CMIP6

مقدمه:

تغییرات اقلیمی از موارد مهم و تأثیرگذار بر زندگی بشر می‌باشد، به طوری که هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) پیش‌بینی نموده است که نرخ تغییر اقلیم در قرن ۲۱ به مقدار بی‌سابقه‌ای در جهان برسد (Cao & Zhou, 2019). از این‌رو همواره محققین به دنبال کسب شناخت بیشتر از تأثیرات این پدیده بر محیط‌زیست، زندگی انسان، حیوانات و گیاهان بوده‌اند. از تأثیرات مهم تغییرات اقلیمی می‌توان به ایجاد نوسانات و تغییراتی در روند متغیرهای هواشناسی همچون بارش و دما اشاره نمود که منجر به ایجاد اختلال در زندگی بشر و اکوسیستم‌های طبیعی خواهد شد (Raziei et al., 2003; Shelton, 2018; Halie et al., 2018). خشکسالی و بیابان‌زایی به عنوان یکی از نمونه‌های تغییر اقلیم ناشی از کاهش بارندگی و افزایش دما به یک مشکل زیست‌محیطی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک تبدیل شده است. وقوع پدیده‌های فوق می‌تواند با خشکی بیشتر در اقلیم مناطق خشک و نیمه‌خشک همراه شود (Azadmanesh & RezaZade, 2020). خشکی یکی از ویژگی‌های دائمی و مرتبط با اقلیم می‌باشد که نشان‌دهنده عدم کفایت بارش‌ها برای پشتیبانی از رشد و ادامه حیات در هر منطقه است (Kaviani & Alijani, 2011). با توجه به موقعیت جغرافیایی کشور ایران واضح است که خشکی از ویژگی‌های این کشور به‌شمار می‌رود. با توجه به اینکه بخش‌های مختلف جامعه از جمله: کشاورزی، صنعت، جمعیت، بهداشت و غیره تحت تأثیر اثرات تشدید خشکی و خشکسالی قرار دارند، بنابراین پایش و درک جامع از اثرات این پدیده به‌منظور ارائه برنامه صحیح برای بخش‌های مختلف جامعه ضروری می‌باشد (Zhang et al., 2012; Amani et al., 2016).

پژوهش‌های متعددی در زمینه تغییرات ویژگی‌های خشکی و خشکسالی در سطح کشور و جهان به انجام رسیده است. به عنوان مثال، فیلپ و همکاران (Philip et al., 2017) با بررسی تغییر اقلیم بر خشکسالی در غرب آفریقا مبتنی بر شاخص‌های SPI، SPEI و SRI نشان دادند که وسعت خشکسالی‌های در دوره‌های آبی در حدود ۲۴ تا ۳۴ درصد افزایش می‌یابد. همچنین شدت خشکسالی براساس شاخص SPEI بیش از شاخص خشکسالی SPI می‌باشد. سرلک و آقا (Sarlak & Agha, 2018) به بررسی تغییرات مکانی و زمانی شاخص‌های خشکی در عراق پرداختند. نتایج نشان داد که مناطق خشک و نیمه‌خشک حدود ۹۷٪ از این کشور را در بر می‌گیرد. به طوری که در شمال عراق از سال ۱۹۹۷ به بعد شرایط نیمه‌خشک به خشک تغییر یافته و در جنوب و مرکز عراق همچنان شرایط خیلی خشک و خشک حاکم می‌باشد. نوروزی و همکاران (Norozi et al., 2018) به پیش‌بینی وضعیت خشکسالی تحت سناریوهای اقلیمی A2 و B1 در ایستگاه‌های ایلام و دهلران تا سال ۲۰۳۷ پرداختند. براساس نتایج ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره پایه از شرایط ترسالی برخوردار می‌باشند، درحالی که پیش‌نگری طی دوره آبی حاکمی از دوره تقریباً خشک برای ایلام و دوره کاملاً خشک برای ایستگاه دهلران می‌باشد. همچنین براساس نتایج مشخص است که با افزایش دوره آماری، تداوم دوره‌های خشک و تر بیشتر و از شدت آن‌ها کاسته می‌شود. صالح پور جم و همکاران (SalehpourJam et al., 2019) در تحقیقی به بررسی ویژگی‌ها خشکسالی در تعدادی از ایستگاه‌های سینوپتیک در محدوده شمال غرب طی ۲ دوره آماری ۱۹ ساله و بر مبنای نمایه دهک‌ها پرداختند. نتایج حاکی از مشهود بودن کاهش بارش متوسط سالانه در کلیه ایستگاه‌ها طی دوره دوم نسبت به دوره اول بود. همچنین براساس نتایج، افزایش فراوانی سال‌های خشک در دوره دوم نسبت به دوره مبنای در تمام ایستگاه‌ها مشخص است. میرگل و همکاران (Mirgol et al., 2021) در تحقیقی با ارزیابی تغییرات مکانی و زمانی خشکسالی در حوضه دریاچه ارومیه تحت سناریوهای اقلیمی گزارش چهارم تغییر اقلیم براساس شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI نشان دادند که دوره‌های آبی نسبت به دوره پایه تحت تمام سناریوهای اقلیمی از نظر روند و مدت زمان خشکسالی با شرایط خشکسالی کمتری مواجه خواهد بود. اما فراوانی خشکسالی‌های شدید در مقیاس فصلی در آینده بیش از دوره پایه است. کوهی و همکاران (Koochi et al., 2022) به بررسی تغییرات ویژگی‌های خشکسالی در حوضه کارون مبتنی بر شاخص خشکسالی فازی براساس متغیرهای بارش، دما و تبخیر و تعرق تحت سناریوهای اقلیمی SSP3-7.0 و SSP5-8.5 در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶ و ۱۲ ماهه پرداختند. ارزیابی شرایط خشکسالی با استفاده از آزمون آماری من‌کنندال طی دوره‌های آبی نشان

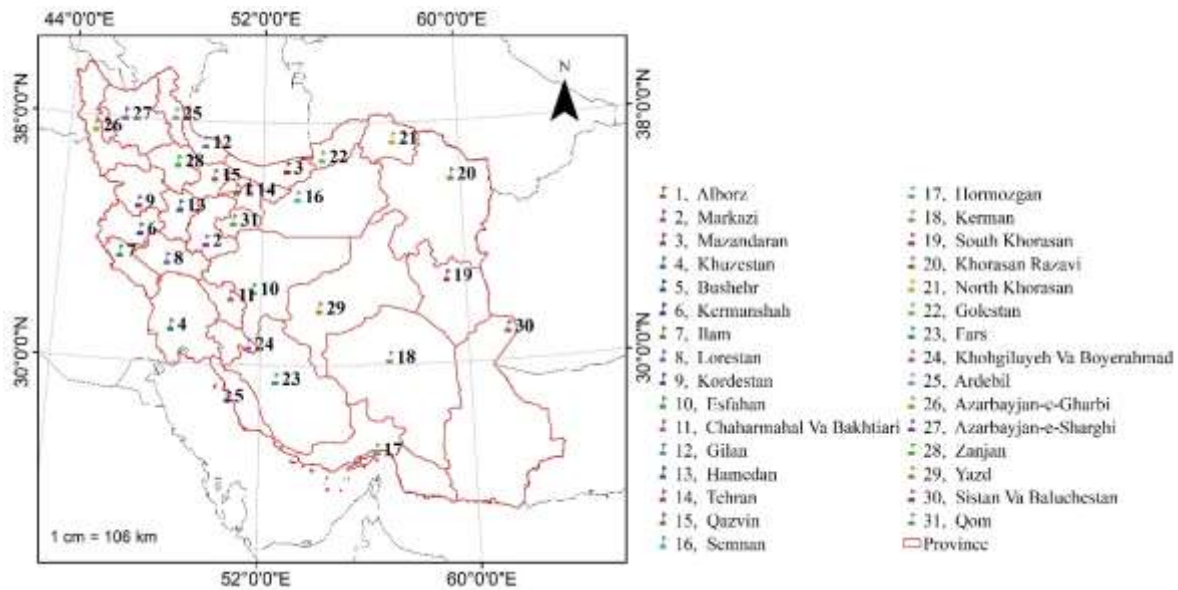
دهنده وجود روند افزایشی در سطح اطمینان ۹۵ درصد به سمت شرایط خشک، افزایش دوره‌های خشک و کاهش دوره‌های تر می‌باشد.

بررسی نتایج حاصل از مطالعات مختلف حاکی از افزایش شدت خشکسالی یا شرایط خشکی در بیشتر مناطق از کشور ایران و جهان در آینده می‌باشد. این موضوع تأثیرات گسترده‌ای بر زندگی انسان‌ها، اکوسیستم‌های طبیعی، و فعالیت‌های اقتصادی خواهد داشت. علی‌رغم مطالعات متعددی که به ارزیابی تغییرات خشکسالی پرداخته‌اند، هنوز شناخت جامعی از میزان و پراکنش جمعیتی که در معرض شدت‌های مختلف از خشکی قرار دارند به‌ویژه در کشور ایران وجود ندارد. این در حالی است که ارزیابی این موضوع می‌تواند نقشی حیاتی در برنامه‌ریزی‌های ملی و منطقه‌ای با هدف کاهش آسیب‌پذیری، تخصیص منابع و توسعه ظرفیت‌های تطبیقی داشته باشد. اما متأسفانه در کمتر تحقیقی به پیش جمعیت در معرض شدت‌های مختلف از خشکی پرداخته شده است. در حالی که بررسی میزان قرارگیری در معرض حوادث ناشی از تغییرات اقلیمی همچون خشکی و خشکسالی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. از آنجایی که عناصری که آسیب‌پذیری را تعریف می‌کنند عبارتند از: مواجهه، حساسیت نسبت به حوادث و ظرفیت تطبیقی (McCarthy et al., 2001; Wade et al., 2017; Jiang et al., 2021). بنابراین، درک از میزان مواجهه با حوادث اقلیمی یکی از پیش‌نیازهای اصلی برای درک از میزان آسیب‌پذیری نسبت به تغییرات اقلیمی به‌شمار می‌رود. براساس تعریفی که توسط IPCC ارائه شده است مواجهه به ماهیت و درجه سطح تنش اقلیمی، خطر، ماهیت و میزان تغییر در متغیرهای اقلیمی مرتبط می‌باشد (O'Brien et al., 2004; Aven et al., 2015). با توجه به موقعیت جغرافیایی ایران که بخش عمده‌ای از آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک قرار دارد و با در نظر گرفتن پیش‌بینی‌های مربوط به رشد جمعیت در آینده و افزایش فشار بر منابع طبیعی، انتظار می‌رود با گسترش وقوع خشکی در بخش‌های مختلف کشور، خطرات ناشی از در معرض این پدیده قرار گرفتن جمعیت نیز افزایش یابد. بنابراین، نیاز مبرم به مطالعه‌ای جهت شناسایی و ارزیابی میزان جمعیتی که در معرض شدت‌های مختلف خشکی قرار دارند، احساس می‌شود. با توجه به توضیحات فوق، هدف اصلی از این پژوهش، ارزیابی این است که در بخش‌های مختلف کشور چه تعداد از جمعیت تحت تأثیر چه شدتی از خشکی قرار خواهند گرفت.

مواد و روش‌ها:

منطقه مورد مطالعه:

این مطالعه در سطح کشور ایران به انجام رسیده است. برای این منظور از اطلاعات ۳۱ ایستگاه سینوپتیک واقع در استان‌های مختلف کشور استفاده شده است. در این مطالعه مقادیر بارش، متوسط دمای ماهانه، بیشینه دمای ماهانه ایستگاه‌های سینوپتیک طی دوره آماری ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۴ به عنوان داده‌های مشاهداتی در نظر گرفته شده است. این نکته لازم به ذکر است که با توجه به محدودیت در داده‌های تاریخی مربوط به گزارش ششم تغییر اقلیم که توسط مجموعه NEX-GDDP است (۱۹۵۰ تا ۲۰۱۴) و تعداد بالای ایستگاه‌های مورد مطالعه و جدیدالتأسیس بودن برخی از آن‌ها، بازه آماری مشترک بین ایستگاه‌ها و مجموعه NEX-GDDP برای دوره پایه ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۴ در نظر گرفته شده است. در شکل ۱، موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد استفاده در این مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه

Fig 1. Geographical location of the studied synoptic stations

داده‌های اقلیمی مورد استفاده:

گزارش ششم تغییر اقلیم (AR6) از جدیدترین و پیشرفته‌ترین نتایج گزارشات هیئت بین‌الدول‌ی تغییر اقلیم (IPCC) می‌باشد. در این گزارش از مجموعه جدیدتری از سناریوهای انتشار با عنوان مسیره‌های مشترک اجتماعی-اقتصادی (SSP^۱) استفاده شده است. این سناریوها مبتنی بر توسعه پایدار، رقابت منطقه‌ای، نابرابری، گسترش استفاده از سوخت‌های فسیلی و توسعه بر مبنای سیاست‌های بینابین می‌باشند و در ۵ گروه قرار دارند (O'Neill et al., 2017; Rogelj et al., 2018). سناریوهای مختلف از گزارش ششم به صورت SSPx-y نشان داده می‌شوند، که در آن x نشان‌دهنده مسیر اجتماعی-اقتصادی و شامل ۵ مسیر اصلی از ۱ تا ۵ می‌باشد. y نمایانگر سطح انتشار گازهای گلخانه‌ای است که بر حسب وات بر مترمربع از ۱/۹ تا ۸/۵ تا سال ۲۱۰۰ مشخص می‌شود. به عنوان مثال، SSP2-4.5 یک سناریوی میانه که در آن روندهای اجتماعی-اقتصادی جاری ادامه یافته و میزان انرژی اضافی در سیستم زمین به واسطه انتشار گازهای گلخانه‌ای تا سال ۲۱۰۰ به ۴٫۵ وات بر مترمربع می‌رسد. در مطالعه حاضر، از داده‌های بارش، متوسط و بیشینه دما ریزمقیاس شده توسط مجموعه NEX-GDDP^۲، مربوط به ۵ مدل گردش عمومی جو (GCM^۳) شامل: CNRM-CM6-1، CanESM5، GFDL-ESM4، HadGEM3-GC31-LL و MIROC6 تحت سناریوهای انتشار SSP2-4.5 (بیانگر شرایط حد واسط) و SSP5-8.5 (بیانگر مصرف بالای انرژی و سوخت فسیلی) استفاده شده است. مجموعه NEX-GDDP به ارائه داده‌های اقلیمی ریزمقیاس شده (بارش، حداقل، حداکثر و متوسط دما، سرعت باد و رطوبت نسبی) از مدل‌های گزارش پنجم و ششم تغییر اقلیم می‌پردازد. خروجی‌های این مجموعه در سامانه گوگل ارث‌انجین GEE^۴ برای دوره تاریخی ۱۹۵۰ تا ۲۰۱۴ و از سال ۲۰۱۵ تا ۲۱۰۰ تحت دو سناریوی اقلیمی در دسترس قرار دارد. اطلاعات مورد نیاز در این پژوهش شامل بارش، متوسط و بیشینه دما، در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۴ برای دوره پایه و دوره آتی ۲۰۲۵ تا ۲۰۳۶ با کدنویسی در سامانه GEE دریافت شده است. لازم به ذکر است که توان تفکیک مکانی خروجی‌های اقلیمی ارائه شده توسط این مجموعه، ۰٫۲۵ درجه و در مقیاس زمانی روزانه می‌باشد. با توجه به اهمیت ادغام خروجی‌های اقلیمی در دوره پایه

^۱ Shared Socioeconomic Pathways

^۲ NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections

^۳ General Circulation Model

^۴ Google Earth Engine

(Mirakbari et al., 2018; Mohan & Bhaskaran, 2019; Ramezani Etedali et al., 2023) بهینه‌سازی ضرایب ادغام مدل‌های اقلیمی توسط الگوریتم Evolutionary مربوط به تابع بهینه‌سازی Solver در نرم‌افزار Excel انجام شده است. الگوریتم Evolutionary از جمله الگوریتم‌ها در شاخه هوش مصنوعی است که در آن جستجو از چندین نقطه در فضای تصمیم آغاز می‌شود (Xia et al., 2013). لازم به ذکر است که حداقل نمودن شاخص خطای MAE محاسباتی بین خروجی اقلیمی حاصل از ادغام ۵ مدل اقلیمی و مقادیر مشاهداتی به عنوان تابع هدف برای کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب وزن تأثیر هر یک از مدل‌های اقلیمی برای ادغام و توسعه یک خروجی اقلیمی مورد بهینه‌سازی قرار خواهد گرفت. پس از بهینه‌سازی ضرایب هر یک از مدل‌های اقلیمی در دوره پایه، خروجی ۵ مدل اقلیمی براساس ضرایب بهینه تلفیق شده و میزان خطای خروجی اقلیمی در دوره پایه نسبت به مقادیر مشاهداتی به تفکیک برای شبیه‌سازی بارش، متوسط و بیشینه دما مورد ارزیابی قرار گرفته است. سپس با در نظر گرفتن ضریب هر مدل در دوره پایه، خروجی مدل‌های اقلیمی برای دوره آتی با یکدیگر ادغام شده است.

شاخص‌های خشکی مورد استفاده:

در این مطالعه از دو شاخص خشکی که کاربرد نسبتاً گسترده‌ای در تعیین اقلیم مناطق مختلف دارند شامل شاخص خشکی De Martonne (DMI) و Erinc's (EAI) بهره گرفته شده است. شاخص خشکی دومارتن بر مبنای متوسط بارش و دمای سالانه توسط دومارتن در سال ۱۹۲۶ توسعه داده شده است (De Martonne, 1926). اگرچه این شاخص از قدیمی‌ترین و ساده‌ترین شاخص‌های خشکی به‌شمار می‌رود. اما با توجه به کارایی مناسب آن در شناسایی اقلیم‌های خشک تا مرطوب، همچنان در تحقیقات زیادی در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. شاخص خشکی EAI براساس نسبت بین متوسط بارش سالانه و متوسط بیشینه دمای سالانه به تمایز اقلیم‌های خیلی خشک تا خیلی مرطوب از هم می‌پردازد (Erinc, 1965). محاسبه شاخص‌های اقلیمی فوق توسط روابط ۳ و ۴ امکان‌پذیر می‌باشد. تقسیم‌بندی انواع اقلیم بر مبنای دو شاخص DMI و EAI در جدول ۱ نشان داده شده است.

$$DMI = \left(\frac{P}{T + 10} \right) \quad (1)$$

$$EAI = \frac{P}{TX} \quad (2)$$

که در آن، P مجموع بارش (میلی‌متر)، T متوسط دما (درجه سانتی‌گراد) و TX متوسط دمای بیشینه (درجه سانتی‌گراد) می‌باشد.

جدول ۱. طبقه‌بندی اقلیمی براساس شاخص‌های خشکی مورد استفاده در این پژوهش

Table 1. Climatic classification based on aridity indices used in this research

EAI		DMI	
شاخص خشکی	نوع اقلیم	شاخص خشکی	نوع اقلیم
Aridity Index	Climate Type	Aridity Index	Climate Type
$EAI \leq 8$	خیلی خشک (Extra Arid)	$0 \leq DMI < 5$	خیلی خشک (Extra Arid)
$8 < EAI \leq 15$	خشک (Arid)	$5 \leq DMI < 10$	خشک (Arid)
$15 < EAI \leq 23$	نیمه‌خشک (Semi Arid)	$10 \leq DMI < 20$	نیمه‌خشک (Semi Arid)
$23 < EAI \leq 40$	نیمه‌مرطوب (Semi Humid)	$20 \leq DMI < 24$	مدیترانه‌ای (Mediterranean)
$40 < EAI \leq 55$	مرطوب (Humid)	$24 \leq DMI < 28$	نیمه‌مرطوب (Semi Humid)
$55 < EAI$	خیلی مرطوب (Per Humid)	$28 \leq DMI < 35$	مرطوب (Humid)
		$35 \leq DMI < 55$	خیلی مرطوب نوع ۱ (Per Humid A)

جمعیت در معرض خشکسالی:

در این مطالعه، از جمعیت استان‌های کشور در بازه زمانی فوق که توسط سازمان آمار برآورد و در سایت این سازمان به نشانی <https://amar.org.ir/statistical-information> ارائه شده، به عنوان جمعیت مبنا در دوره پایه استفاده شده است. نتیجه پیش بینی جمعیت برای استان‌های کشور در گزارشی توسط فتاحی در سال ۱۳۹۹ به چاپ رسیده است. با توجه به اهمیت آگاهی از جمعیت و تغییرات آن در آینده، در سال ۱۳۹۶ جمعیت کل کشور تا افق ۱۴۳۰ و جمعیت استانی تا سال ۱۴۱۵ توسط سازمان آمار پیش‌بینی و نتایج آن پس از تصویب کمیته آمار بخشی جمعیت منتشر شد (Fathi, 2020). به این ترتیب جمعیت در دو مرحله پیش‌بینی شده است، ابتدا جمعیت کل کشور به صورت مستقل و با شش سناریو پیش‌بینی شد و سپس جمعیت ۳۱ استان با یک سناریو (سناریو محتمل) مورد پیش‌بینی قرار گرفته است. بازنگری پیش‌بینی جمعیت در بیست و نهمین جلسه کمیته بخشی آمار جمعیت، مورخ ۱۴۰۰/۰۷/۰۶ انجام پذیرفت. این سازمان برای پیش‌بینی جمعیت از روش ترکیبی (مولفه‌های - نسلی) و نرم‌افزار اسپکتروم ۴ که توسط سازمان ملل نیز به‌عنوان روش "استاندارد طلایی" در برآورد و پیش‌بینی‌های آمارهای رسمی معرفی شده، استفاده نموده است. روش ترکیبی مولفه‌های - نسلی از روش‌های پرکاربرد برای پیش‌بینی جمعیت به‌شمار می‌رود. در این روش جمعیت پیش‌بینی شده بر اساس مجموعه‌ای از عوامل مؤثر بر تغییر و تحول جمعیت شامل باروری، مرگ و میر، مهاجرت و ترکیب سنی و جنسی جمعیت به‌دست می‌آید. با توجه به اینکه در این روش، جمعیت متناسب با سن و جنس پیش‌بینی می‌شود، بنابراین می‌تواند به نیازهای وسیع و متعدد کاربران در زمینه پیش‌بینی‌های جمعیتی پاسخ دهد (Fathi, 2020). در این مطالعه، از جمعیت پیش‌بینی شده برای ۳۱ استان طی دوره آماری ۲۰۲۵ تا ۲۰۳۶ به عنوان جمعیت مبنا برای دوره آتی استفاده شده است.

مبنای این پژوهش برای ارزیابی جمعیت تحت تأثیر خشکی، تعداد افرادی است که در معرض شرایط اقلیمی خیلی خشک، خشک و نیمه‌خشک قرار دارند. برای این منظور، مجموع جمعیتی که در هر منطقه تحت تأثیر شدت‌های مختلفی از خشکی قرار دارند محاسبه و با نتایج دوره پایه مورد مقایسه قرار گرفته است. برای بررسی تغییرات جمعیت در معرض خشکی، ۳۱ استان مورد مطالعه با توجه به موقعیت جغرافیایی خود به ۵ گروه (شامل: شمال، جنوب، شرق، غرب و مرکزی) تقسیم شدند (جدول ۲).

جدول ۲. طبقه‌بندی ایستگاه‌های مورد مطالعه در موقعیت‌های جغرافیایی مختلف

Table 2. Classification of studied stations in different geographical locations

استان Province	موقعیت جغرافیایی Geographical location	استان Province	موقعیت جغرافیایی Geographical location	
ایلام	غرب (West)	اردبیل	شمال (North)	
آذربایجان غربی		البرز		
چهارمحال و بختیاری		تهران		
خوزستان		خراسان شمالی		
زنجان		قزوین		
کردستان		گلستان		
کرمانشاه		گیلان		
کهگیلویه و بویراحمد		مازندران		
لرستان		بوشهر		جنوب (South)
همدان		فارس		
آذربایجان شرقی	کرمان			
اصفهان	مرکز (Center)	هرمزگان	شرق (East)	
سمنان		خراسان جنوبی		
قم		خراسان رضوی		
مرکزی		سیستان و بلوچستان		

شاخص‌های ارزیابی مورد استفاده:

در این پژوهش از شاخص‌های آماری شامل میانگین قدرمطلق خطا (MAE^۵)، میانگین انحراف خطا (MBE^۶)، ضریب همبستگی^۷ (R²) و جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE^۸) برای ارزیابی عملکرد خروجی اقلیمی در شبیه‌سازی بارش، متوسط و بیشینه دما طی دوره پایه استفاده شده است. برای شاخص‌های آماری MAE، MBE و NRMSE عدد صفر حاکی از دقت بیشتر و خطای کمتر داده‌های اقلیمی می‌باشد. مقادیر مثبت MBE بیانگر بیش‌برآوردی و مقادیر منفی برای این شاخص، گویای کم‌برآوردی داده‌های اقلیمی است. همچنین مقادیر ۱ برای ضریب همبستگی حاکی از همبستگی کامل خروجی اقلیمی نسبت به مقادیر مشاهداتی می‌باشد. محاسبه شاخص‌های مذکور با استفاده از روابط ۳ تا ۶ امکان‌پذیر می‌باشد:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |O_i - S_i|}{N} \quad (۳)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)}{N} \quad (۴)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2}} \quad (۵)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}}{O_{\max} - O_{\min}} \quad (۶)$$

که در آن، S_i : مقادیر داده‌های اقلیمی، \bar{S} : متوسط مقادیر اقلیمی، O_i : مقادیر مشاهداتی، \bar{O} : متوسط مقادیر مشاهداتی، O_{\max} و O_{\min} به ترتیب بیشینه و کمینه مقادیر مشاهداتی، N : تعداد داده‌ها می‌باشد.

نتایج و بحث:

بررسی خروجی اقلیمی در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی در دوره پایه:

در این بخش پس از بهینه‌سازی ضرایب هر مدل به منظور ادغام آن‌ها، عملکرد خروجی مدل اقلیمی در تخمین متغیرهای جوی مؤثر در محاسبه شاخص‌های خشکی شامل: بارش، میانگین و بیشینه دمای هوا در مقیاس زمانی ماهانه و در دوره پایه (۲۰۰۱ تا ۲۰۱۴) مورد ارزیابی قرار گرفته است. در جدول ۳ تغییرات مقدار شاخص‌های آماری MAE و MBE بین مقادیر متغیرهای جوی به دست آمده از خروجی اقلیمی نسبت به مقادیر مشاهداتی به تفکیک هر یک از ایستگاه‌های مطالعاتی ارائه شده است. طبق نتایج به دست آمده، در سطح ایستگاه‌های مورد مطالعه برای تخمین تغییرات بارش مشاهده می‌شود که مقدار شاخص MAE از ۳/۵ تا ۷۰/۰ میلی‌متر متغیر است. مقدار متوسط شاخص خطای MAE در سطح ایستگاه‌ها ۱۷/۹ میلی‌متر تخمین زده شده است و در حدود بیش از ۶۰ درصد از ایستگاه‌ها مقدار متوسط قدر مطلق خطا کمتر از ۱۵ میلی‌متر می‌باشد. براساس

^۵ Mean Absolute Error

^۶ Mean Bias Error

^۷ Correlation Coefficient

^۸ Normalized Root Mean Square Error

نتایج مشخص است که بیشترین خطای خروجی اقلیمی در شبیه‌سازی بارش در استان‌های گیلان، کهگیلویه و بویراحمد، مازندران، گلستان، ایلام، خوزستان، تهران، فارس، لرستان، بوشهر، مرکزی و چهارمحال و بختیاری بوده است، چنانکه متوسط قدرمطلق خطا در شبیه‌سازی بارش ماهانه طی دوره ماهانه برای ایستگاه‌های مذکور بیش از ۱۷ میلی‌متر می‌باشد. ارزیابی نتایج براساس شاخص آماری MBE که نشان‌دهنده میانگین انحراف در داده‌ها است حاکی از آن می‌باشد که در شبیه‌سازی تغییرات بارش توسط خروجی اقلیمی، میزان اریبی داده‌ها از مقادیر مشاهداتی در اکثر ایستگاه‌های مطالعاتی به غیر از مازندران، گیلان، خوزستان و اصفهان به ۱۲/۰ میلی‌متر محدود شده است. با توجه به نتایج مشخص است که خروجی اقلیمی تمایل به بیش برآوردی در شبیه‌سازی بارش دارد، به طوری که فقط در ایستگاه خوزستان مقدار بارش مدل‌های اقلیمی با کم‌برآوردی نسبت به مقادیر مشاهداتی همراه بوده است ($MBE = -7/3$). ارزیابی نتایج حاکی از آن است که تمایل خروجی اقلیمی در شمال و بخش‌های از غرب کشور شامل استان‌های گیلان، مازندران، گلستان، همدان و کهگیلویه و بویراحمد بیش‌برآورد در شبیه‌سازی بارش ماهانه بوده است. عملکرد خروجی اقلیمی در شبیه‌سازی بارش ماهانه از نظر میانگین انحراف خطا در سایر ایستگاه‌های مورد مطالعه به کمتر از ۴/۸ میلی‌متر محدود شده است.

ارزیابی عملکرد خروجی اقلیمی در تخمین متوسط دمای هوا حاکی از آن است که مدل‌های اقلیمی از عملکرد خوبی در شبیه‌سازی تغییرات متوسط دمای هوا طی دوره پایه برخوردار می‌باشند. به طوری که مقدار متوسط شاخص میانگین قدرمطلق خطا در سطح ایستگاه‌های مورد مطالعه برابر است با ۲/۳ درجه سانتی‌گراد که مناسب ارزیابی می‌شود. بیشینه متوسط قدرمطلق خطا در تخمین متوسط دمای هوای ماهانه در ایستگاه‌های خوزستان، اصفهان، مرکزی، تهران و قم به ترتیب برابر است با ۱۴/۴، ۸/۲، ۴/۹، ۳/۸ و ۳/۶ درجه سانتی‌گراد می‌باشد؛ در سایر ایستگاه‌ها متوسط شاخص MAE به کمتر از ۲/۱ درجه سانتی‌گراد محدود شده است. براساس شاخص MBE در شبیه‌سازی تغییرات ماهانه‌ی متوسط دمای هوا نیز نشان داده شده است که محدوده تغییرات این شاخص آماری برای خروجی اقلیمی به جز ایستگاه خوزستان (که با کم‌برآوردی در تخمین دما همراه بوده است)، ۰/۸- تا ۳/۲ درجه سانتی‌گراد برآورد شده است. بررسی نتایج در شبیه‌سازی بیشینه دمای ماهانه حاکی از آن است که خروجی مدل‌های اقلیمی در شبیه‌سازی این متغیر از عملکرد مناسبی برخوردار بوده است، به طوری که در ۸۰/۷ درصد از ایستگاه‌های مطالعاتی مقدار شاخص قدرمطلق خطا در تخمین بیشینه دمای ماهانه به ۵ درجه سانتی‌گراد محدود شده است و محدوده تغییرات برای شاخص میانگین انحراف در داده‌ها نسبت به مقادیر مشاهداتی در ۸۷/۱ درصد از ایستگاه‌ها ۵- تا ۵ درجه سانتی‌گراد تخمین زده شده است که نشان از مناسب بودن میزان اریبی داده‌های دما (متوسط و بیشینه دما) نسبت به مقادیر مشاهداتی در سطح ایستگاه‌های مورد بررسی در طول دوره آماری این مطالعه می‌باشد. با توجه به نتایج، بیشینه شاخص خطای MAE در شبیه‌سازی بیشینه دمای هوا ماهانه در ایستگاه‌های خوزستان، همدان، اصفهان، گیلان و مرکزی (بیش از ۵/۷ درجه سانتی‌گراد) می‌باشد. همچنین براساس نتایج خروجی اقلیمی در ایستگاه‌های خوزستان و سمنان (MBE بیش از ۵/۰ درجه سانتی‌گراد) با بیش‌برآوردی و در استان‌های همدان و گیلان (MBE کمتر از ۵/۰- درجه سانتی‌گراد) با کم‌برآوردی در تخمین بیشینه دمای هوا همراه بوده است.

جدول ۳. تغییرات شاخص‌های MAE و MBE در شبیه‌سازی متغیرهای جوی بارش، متوسط و بیشینه دمای هوا در دوره پایه در مقیاس ماهانه

Table 3. The of MAE and MBE indices in the simulation of precipitation, average and maximum air temperature in the base period on a monthly scale

ایستگاه (Station)	MAE_Pr (mm)	MBE_Pr (mm)	MAE_t (°C)	MBE_t (°C)	MAE_tmax (°C)	MBE_tmax (°C)	ایستگاه (Station)	MAE_Pr (mm)	MBE_Pr (mm)	MAE_t (°C)	MBE_t (°C)	MAE_tmax (°C)	MBE_tmax (°C)
آذربایجان غربی	13.6	1.1	1.5	0.2	1.9	-0.5	فارس	19.7	4.1	1.1	0.3	1.3	-0.4
آذربایجان شرقی	11.3	0.4	1.5	0.0	2.5	1.6	قزوین	13.4	1.9	1.3	0.0	1.8	0.8
ایلام	25.7	3.5	1.6	0.6	2.3	-1.6	قم	8.9	0.8	3.6	-0.8	2.5	2.2
اردبیل	14.3	3.5	1.9	0.7	3.5	-1.4	کردستان	15.8	2.3	1.9	1.2	2.5	2.2
البرز	11.9	2.1	1.4	0.3	2.0	-1.2	کرمان	8.0	2.4	1.2	0.3	1.4	0.3
اصفهان	11.6	4.4	8.2	2.2	9.2	0.9	کرمانشاه	17.4	2.8	1.7	0.9	3.3	3.2
بوشهر	18.4	4.5	1.0	0.1	4.9	-4.9	کهگیلویه و بویراحمد	46.0	6.7	1.1	0.4	1.6	-0.8
تهران	21.6	3.9	3.8	3.2	3.9	-0.6	گلستان	26.4	12.2	1.3	0.0	2.0	1.3
چهار محال و بختیاری	17.4	1.8	1.2	-0.3	1.7	-0.9	گیلان	70.0	25.7	1.3	0.1	5.8	-5.6
خراسان جنوبی	7.8	1.9	1.5	0.4	1.7	0.0	لرستان	18.9	1.9	1.5	0.7	2.0	1.6
خراسان رضوی	11.4	2.5	1.5	0.3	1.8	0.2	مازندران	40.1	20.1	1.3	-0.1	5.0	-4.9
خراسان شمالی	12.5	4.0	1.9	1.1	2.2	0.0	مرکزی	17.6	4.7	4.9	0.4	5.7	-1.2
خوزستان	22.7	-7.3	14.4	-13.4	25.4	7.5	هرمزگان	11.5	3.2	0.8	0.1	1.1	-0.3
زنجان	13.9	2.2	2.1	1.6	2.1	1.2	همدان	15.1	7.8	1.4	0.1	15.8	15.7
سمنان	8.8	2.1	1.5	0.4	5.3	5.2	یزد	3.8	0.8	1.2	0.0	2.3	1.7
سیستان و بلوچستان	3.5	1.0	1.3	0.0	4.0	3.9							

بررسی میزان همبستگی مقادیر بارش گزارش ششم تغییرات اقلیمی نسبت به مقادیر مشاهداتی (جدول ۴) نشان داد که بیشترین همبستگی بین مقادیر بارش مشاهداتی و خروجی اقلیمی در استان‌های غربی و بخش‌هایی از شمال و شرق کشور می‌باشد. به طوری که مقدار شاخص همبستگی R^2 در ایستگاه‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی، ایلام، چهار محال و بختیاری، زنجان، کرمانشاه، کهگیلویه و بویراحمد، لرستان، همدان، البرز، تهران، قزوین، خراسان شمالی، خراسان جنوبی، خراسان رضوی بیش از ۰/۵۳ تخمین زده شده است. با توجه به نتایج مشخص است که متوسط و بیشینه دمای هوا ماهانه حاصل از خروجی مدل‌های اقلیمی به غیر از ایستگاه اصفهان، در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه از همبستگی قوی نسبت به مقادیر مشاهداتی برخوردار می‌باشد، چنانکه مقدار شاخص R^2 در ایستگاه‌ها بیش از ۰/۸۲ می‌باشد. ارزیابی نتایج براساس شاخص NRMSE گویای این مطلب است که بیشترین خطای خروجی اقلیمی در شبیه‌سازی بارش ماهانه به ترتیب در ایستگاه‌های مازندران، همدان، گیلان، خوزستان و گلستان برابر با ۰/۲۶، ۰/۲۶، ۰/۲۳، ۰/۲۲ و ۰/۲۱ برآورد شده است؛ در سایر ایستگاه مقدار شاخص NRMSE کمتر از ۰/۲۰ تخمین زده شده است. در شبیه‌سازی متوسط دمای هوا بیشینه خطای خروجی اقلیمی در ایستگاه اصفهان و معادل ۰/۲۵ می‌باشد، در سایر ایستگاه‌های مورد مطالعه مقدار شاخص NRMSE به ۰/۱۴ محدود شده است. با توجه به نتایج، محدوده تغییرات شاخص NRMSE برای تخمین بیشینه دمای هوا در مقیاس ماهانه، ۰/۰۶ تا ۰/۵۲ می‌باشد. به طوری که بیشینه مقدار شاخص

NRMSE در ایستگاه‌های خوزستان، همدان، اصفهان، گیلان و بوشهر به ترتیب معادل است با ۰/۵۲، ۰/۴۴، ۰/۲۹، ۰/۲۳ و ۰/۲۲. به‌طور کلی، با توجه به نتایج در دوره پایه می‌توان چنین عنوان نمود که خروجی اقلیمی حاصل از مدل‌های گردش عمومی جو گزارش ششم تغییر اقلیم از عملکرد مناسبی در شبیه‌سازی تغییرات بارش در اکثر ایستگاه‌های مطالعاتی به غیر از استان‌های شمالی و برخی از استان‌های غربی شامل خوزستان، ایلام و کهگیلویه و بویراحمد برخوردار بوده است. همچنین عملکرد خروجی اقلیمی گزارش ششم تغییر اقلیم در تخمین متغیرهای جوی شامل متوسط و بیشینه دمای هوا در استان‌های کشور به جز خوزستان، اصفهان و همدان می‌تواند مناسب ارزیابی شود.

جدول ۴. تغییرات شاخص‌های R^2 و NRMSE در شبیه‌سازی متغیرهای جوی بارش، متوسط و بیشینه دمای هوا در دوره پایه در مقیاس

ماهانه

Table 4. The CC and NRMSE indices in the simulation of precipitation, average and maximum air temperature in the base period on a monthly scale

ایستگاه (Station)	CC_Pr	NRMSE_Pr	CC_t	NRMSE_t	CC_tmax	NRMSE_tmax	ایستگاه (Station)	CC_Pr	NRMSE_Pr	CC_t	NRMSE_t	CC_tmax	NRMSE_tmax
آذربایجان غربی	0.61	0.15	0.98	0.06	0.98	0.07	فارس	0.49	0.12	0.98	0.04	0.99	0.06
آذربایجان شرقی	0.64	0.15	0.98	0.06	0.98	0.08	قزوین	0.66	0.18	0.98	0.05	0.98	0.06
ایلام	0.59	0.14	0.98	0.05	0.98	0.09	قم	0.41	0.19	0.92	0.11	0.92	0.15
اردبیل	0.34	0.22	0.95	0.08	0.94	0.12	کردستان	0.67	0.19	0.98	0.07	0.98	0.08
البرز	0.62	0.17	0.98	0.05	0.98	0.06	کرمان	0.47	0.17	0.98	0.05	0.98	0.06
اصفهان	0.12	0.20	0.46	0.25	0.44	0.29	کرمانشاه	0.64	0.20	0.98	0.06	0.98	0.10
بوشهر	0.53	0.16	0.96	0.05	0.98	0.22	کهگیلویه و بویراحمد	0.58	0.13	0.99	0.05	0.98	0.06
تهران	0.54	0.20	0.98	0.14	0.98	0.12	گلستان	0.33	0.21	0.97	0.05	0.97	0.09
چهار محال و بختیاری	0.64	0.19	0.98	0.05	0.98	0.06	گیلان	0.31	0.23	0.96	0.06	0.96	0.23
خراسان جنوبی	0.66	0.19	0.97	0.06	0.97	0.06	لرستان	0.73	0.16	0.98	0.06	0.99	0.07
خراسان رضوی	0.61	0.15	0.97	0.06	0.97	0.06	مازندران	0.44	0.26	0.97	0.06	0.97	0.20
خراسان شمالی	0.63	0.17	0.98	0.08	0.97	0.08	مرکزی	0.41	0.20	0.82	0.14	0.82	0.15
خوزستان	0.42	0.22	0.97	0.05	0.98	0.52	هرمزگان	0.35	0.12	0.94	0.05	0.98	0.06
زنجان	0.59	0.18	0.98	0.09	0.98	0.07	همدان	0.53	0.26	0.98	0.05	0.98	0.44
سمنان	0.43	0.16	0.98	0.05	0.98	0.15	یزد	0.44	0.20	0.98	0.05	0.98	0.07
سیستان و بلوچستان	0.46	0.10	0.98	0.05	0.97	0.13							

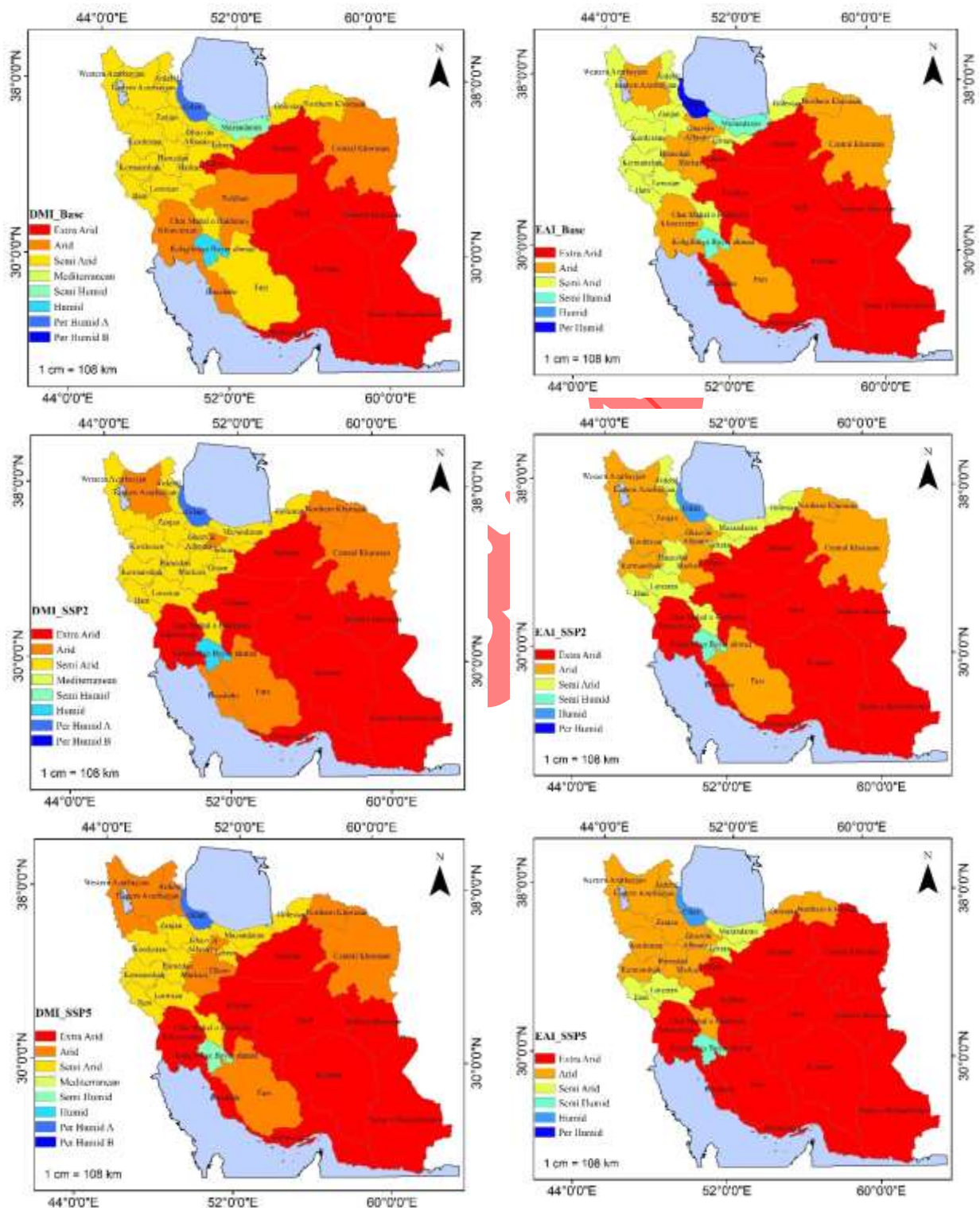
بررسی شرایط اقلیمی در دوره پایه و آینده:

در این بخش از پژوهش، به طبقه‌بندی اقلیمی استان‌ها در دوره پایه و همچنین تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 بر مبنای شاخص‌های خشکی DMI و EAI طی دوره ۲۰۲۵ تا ۲۰۳۶ پرداخته شده است. نتایج طبقه‌بندی اقلیمی استان‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود براساس شاخص DMI طی دوره مشاهداتی ۷، ۱۷ و ۴ ایستگاه از ایستگاه‌های مورد مطالعه به ترتیب در اقلیم‌های خیلی خشک، نیمه‌خشک و خشک قرار دارند. با توجه به شکل ۳ مشخص است که براساس شاخص خشکی EAI در دوره پایه ۹، ۱۰ و ۹ ایستگاه از ایستگاه‌های مطالعاتی در اقلیم خیلی خشک، نیمه‌خشک و خشک واقع شده‌اند. بررسی نتایج حاکی از آن است که براساس شاخص خشکی DMI و EAI، تنها استان‌های گیلان، کهگیلویه و بویراحمد و مازندران در دوره پایه دارای اقلیم‌های خیلی مرطوب تا نیمه‌مرطوب می‌باشند.

بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر خشکی در سطح کشور و مبتنی بر شاخص خشکی DMI در دوره ۲۰۲۵ تا ۲۰۳۶ بیانگر تغییر وضعیت اقلیمی استان‌های البرز، خراسان شمالی، مازندران، فارس، خوزستان، آذربایجان شرقی، اصفهان، قم و مرکزی تحت سناریوی SSP2-4.5 به سمت خشک‌تر می‌باشد. با توجه به تغییرات شاخص EAI تحت سناریوی SSP2-4.5، شرایط اقلیمی در استان‌های مازندران، آذربایجان غربی، خوزستان، زنجان، کردستان و کرمانشاه به سمت خشک‌تر شدن تغییر می‌نماید. همچنین کاهش شرایط رطوبتی در استان گیلان از خیلی مرطوب به مرطوب براساس شاخص خشکی EAI تحت سناریوی اقلیمی SSP2-4.5 مشهود می‌باشد. در همین زمینه، نوری و همکاران (Nouri et al., 2016) با بررسی وضعیت اقلیمی در محدوده شمال و شمال‌غرب نشان دادند که شرایط اقلیمی مناطق شمال و شمال‌غربی کشور تحت سناریوهای اقلیمی A2 و B2 در دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه خشک‌تر خواهد شد. با توجه به شکل ۳ مشخص است که تحت سناریوی SSP5-8.5 بخش قابل توجهی از بخش‌های مرکزی، جنوب تا شرق در اقلیم خیلی خشک و محدوده شمال‌غرب کشور در اقلیم‌های نیمه‌خشک تا خشک قرار خواهند گرفت. به‌عنوان مثال، مقدار شاخص خشکی DMI در دوره ۲۰۲۵ تا ۲۰۳۶ تحت سناریوی اقلیمی SSP5-8.5 در استان‌های بوشهر، کرمان، هرمزگان، خراسان جنوبی، سیستان و بلوچستان، خوزستان، اصفهان، سمنان و یزد کمتر از ۵ تخمین زده شده است که بیانگر حاکم بودن اقلیم خیلی خشک در این استان‌ها است و این در حالی است که اقلیم استان‌های بوشهر، خوزستان و اصفهان در دوره پایه خشک بوده است. همچنین مقدار شاخص خشکی EAI تحت سناریوی SSP5-8.5 در استان‌های اردبیل، آذربایجان غربی، چهارمحال و بختیاری، زنجان، کردستان و کرمانشاه در محدوده ۸ تا ۱۵ (بیانگر اقلیم خشک) می‌باشد، در حالی که اقلیم استان‌های مذکور طی دوره پایه نیمه‌خشک است. بررسی نتایج در استان‌های فارس، خراسان رضوی و خوزستان طبق طبقه‌بندی شاخص EAI طی دوره پایه حاکی از حاکم بودن اقلیم خشک می‌باشد در حالی که کاهش مقدار شاخص تحت سناریوی SSP5-8.5 بیانگر برقراری اقلیم خیلی خشک طی دوره آتی در این استان‌ها است.

به‌طور کلی و با توجه به تغییرات شاخص‌های خشکی DMI و EAI مشخص است که تحت سناریوهای اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در دوره ۲۰۲۵ تا ۲۰۳۶ نسبت به دوره پایه، کاهش در مقدار شاخص‌های خشکی و حرکت به سمت اقلیم‌های خشک تا خیلی خشک در بسیاری از ایستگاه‌های مورد مطالعه مشهود می‌باشد. همان‌طور که پیش‌تر نیز عنوان شد، این تغییرات در محدوده مرکز، جنوب، جنوب‌شرق، شرق، شمال‌غرب از شدت بیشتری برخوردار است که با نتیجه مطالعه حسینی و عزیزیان (Hosseini & Azizian, 2022) نیز همخوانی دارد، به‌طوری‌که این محققین با بهره‌گیری از شاخص خشکی برآورد شده توسط پایگاه اقلیمی کوپرنیک تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 در بخش‌های مختلف کشور نشان دادند که در آینده نزدیک بخش‌های زیادی از کشور در نواحی مرکزی، غرب و شرق به سمت خشک‌تر شدن پیش می‌روند. یکی از برتری‌های پژوهش حاضر نسبت به سایر تحقیقات توجه به جنبه‌ای کمتر بررسی شده از خشکی و تغییرات اقلیمی یعنی ارزیابی جمعیت در معرض شدت‌های مختلف از خشکی می‌باشد. در حالی که به‌طور معمول در تحقیقات صرفاً تحلیل شاخص‌های اقلیمی یا پیش‌بینی شرایط خشکی و خشکسالی مورد توجه محققین قرار گرفته است. افزایش میزان خشکی در بخش‌های مرکزی، غرب و شرق کشور می‌تواند منجر به کاهش منابع آبی، کاهش محصولات کشاورزی و در نتیجه سخت‌تر شدن شرایط زندگی در این مناطق شود. ادامه این روند نیز می‌تواند سبب ایجاد تغییراتی همچون تخلیه جمعیت از مناطق خشک و نیمه‌خشک به مناطق مرطوب‌تر شود. این مورد از یک‌سو با ایجاد مشکلات اقتصادی، اجتماعی و ناامنی در استان‌های مبدأ همراه خواهد بود و از سوی دیگر با تمرکز و رشد جمعیت ناشی از مهاجرت داخلی، تشدید مشکلات محیط‌زیستی و منابع طبیعی در استان‌های مقصد دور از انتظار نمی‌باشد. برای کاهش پیامدهای ناشی از خشکی و مهاجرت، مدیریت پایدار منابع آبی از طریق فناوری‌های نوین مانند آبیاری قطره‌ای و بازیافت آب ضروری است. همچنین توسعه کشاورزی مقاوم به خشکی و اصلاح الگوی کشت می‌تواند منجر به کاهش مصرف آب شود. علاوه بر این، تقویت زیرساخت‌های اقتصادی و اجتماعی در استان‌های مبدأ، همراه با آموزش و آگاه‌سازی جامعه درباره تغییرات اقلیمی و اهمیت مدیریت منابع طبیعی، از دیگر راهکارهای مؤثر برای کاهش تأثیرات گسترش خشکی می‌باشد. در کنار

این اقدامات، برنامه‌ریزی دقیق برای مدیریت مهاجرت و حمایت از استان‌های مقصد، می‌تواند فشار بر منابع و مشکلات زیست محیطی را کاهش دهد.



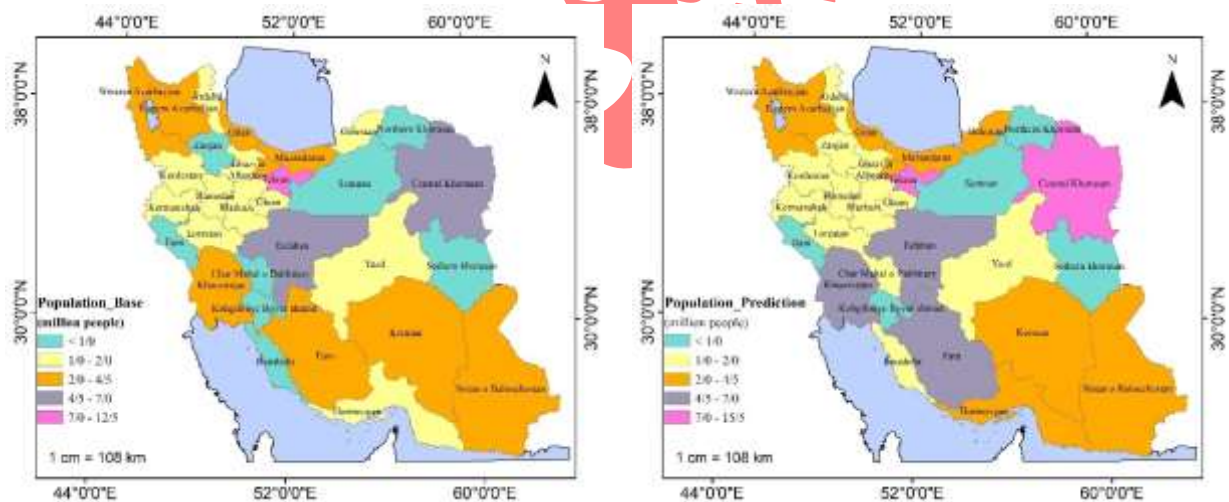
شکل ۲. طبقه‌بندی شاخص‌های خشکی DMI و EAI در دوره پایه و تحت سناریوهای اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در دوره ۲۰۲۵ تا

۲۰۳۶

Figure 2. Classification of DMI and EAI aridity indices in the base period and under climate scenarios SSP2-4.5 and SSP5-8.5 in the period from 2025 to 2036

بررسی تغییرات جمعیت در دوره آینده نسبت به دوره پایه:

در این بخش، به بررسی تغییرات مکانی جمعیت در دوره پایه و آتی پرداخته شده است (شکل ۳). همان گونه که پیش تر نیز عنوان شد برآورد و پیش‌بینی جمعیت در دوره پایه و آتی بر مبنای گزارش‌های ارائه شده توسط سازمان آمار کشور می‌باشد. با توجه به شکل ۳ در دوره پایه استان‌های تهران، خراسان رضوی و اصفهان دارای بیشترین جمعیت می‌باشند، متوسط جمعیت استان‌های فوق در دوره پایه به ترتیب ۱۲/۲، ۶/۰ و ۶۴ میلیون نفر تخمین زده شده است. استان‌های زنجان، خراسان شمالی، سمنان، خراسان جنوبی، کهگیلویه و بویراحمد، ایلام، چهار محال و بختیاری و بوشهر با برخورداری از جمعیتی کمتر از ۱ میلیون نفر از استان‌های با جمعیت کمتر نسبت به سایر استان‌های کشور به‌شمار می‌روند. بررسی جمعیت پیش‌بینی شده توسط سازمان آمار در برای دوره ۲۰۲۵ تا ۲۰۳۶ نشان می‌دهد که استان‌های فارس و خوزستان نیز در این دوره به استان‌های با جمعیت زیاد اضافه می‌شوند. بررسی تغییرات رشد جمعیت در دوره آتی نسبت به پایه حاکی از این است که استان‌های سیستان و بلوچستان، هرمزگان، قم، یزد، بوشهر، سمنان، البرز، خراسان جنوبی و کرمان رشد جمعیتی بالایی را تجربه می‌نمایند، به طوری که نرخ رشد جمعیت نسبت به دوره پایه در استان‌های مذکور به ترتیب ۵۴/۵، ۵۰/۶، ۴۵/۰، ۴۴/۵، ۴۲/۶، ۴۰/۸، ۳۹/۱، ۳۳/۵ و ۳۰/۶ درصد می‌باشد. در حالی که نرخ رشد جمعیت در استان‌های اردبیل، خراسان شمالی، گیلان، ایلام، لرستان، همدان و مرکزی کمتر از ۱۰ درصد است. همان گونه که پیش تر نیز بیان شد مناطق مرکز، جنوب و جنوب شرق از جمله مناطق درگیر با شرایط خشکی در دوره آتی می‌باشند، بنابراین رشد جمعیت در این مناطق می‌تواند منجر به بروز چالش‌های جدیدی از جمله کمبود منابع آبی و افزایش تقاضا برای منابع طبیعی در این استان‌ها شود که با فشار بیشتری بر اکوسیستم‌های محلی همراه خواهد بود.



شکل ۳. تغییرات مکانی جمعیت در دوره پایه و آینده

Figure 3. Spatial changes of the population in the base and future periods

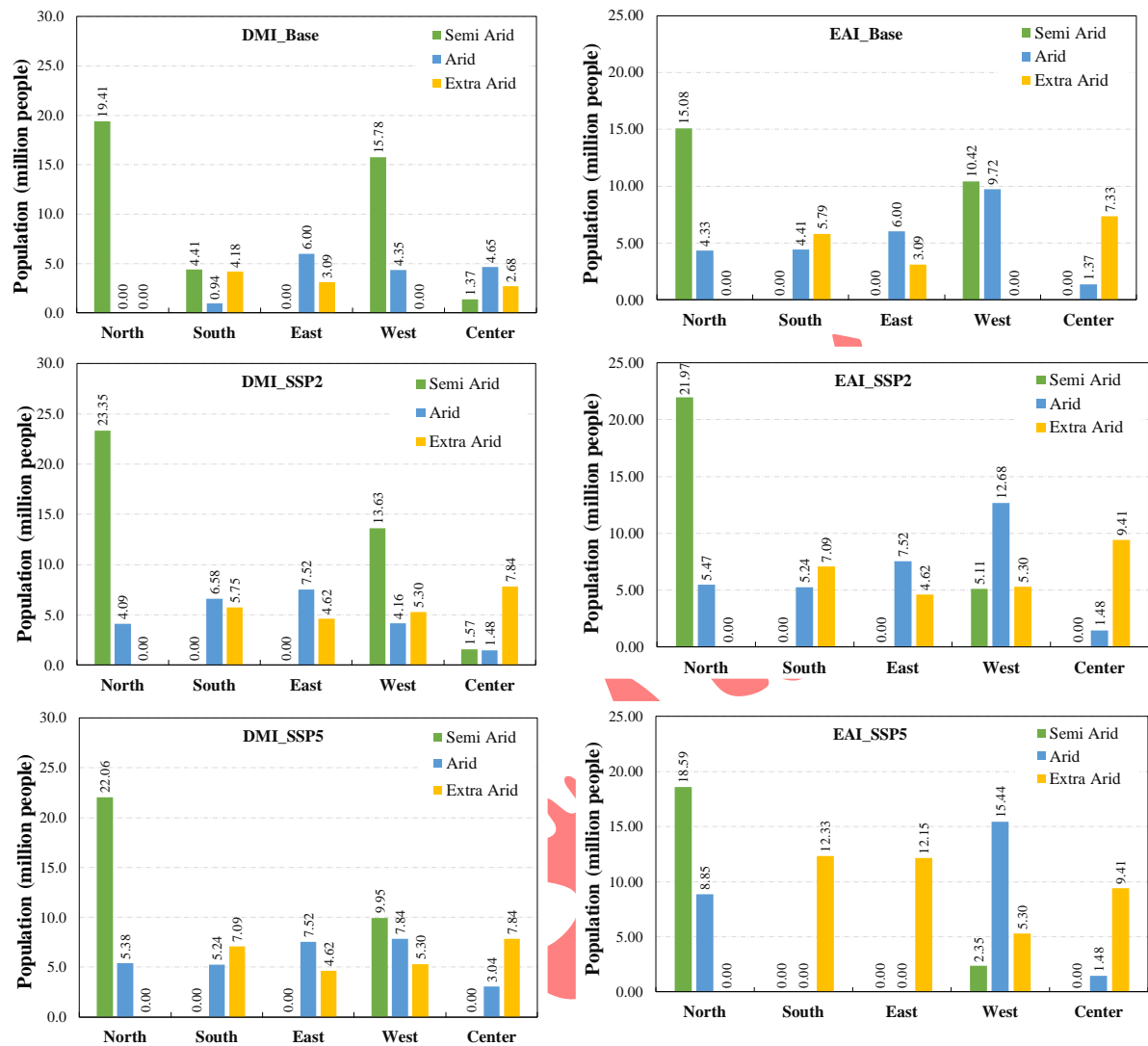
بررسی جمعیت در معرض خشکی:

با توجه به اینکه هدف اصلی از این پژوهش، بررسی جمعیت تحت تأثیر شدت‌های مختلف خشکسالی تحت تأثیر تغییرات اقلیم است، جمعیت واقع در هر بخش (جمعیت دوره پایه و جمعیت پیش‌بینی شده) که تحت تأثیر درجات مختلف خشکی شامل خشک، نیمه خشک و خیلی خشک قرار دارند در دوره پایه و آینده محاسبه و نتایج در شکل ۴ ارائه شده است. بدین ترتیب میزان جمعیت تحت تأثیر شدت‌های مختلف خشکی تحت تأثیر هر دو عامل تغییر شرایط اقلیمی و همچنین تغییرات جمعیتی مورد مطالعه قرار گرفته شده است. بر اساس شاخص خشکی DMI در بخش‌های شمال و غرب کشور در دوره پایه به ترتیب ۱۹/۴ و ۱۵/۸ میلیون نفر و مبتنی بر شاخص خشکی EAI به ترتیب ۱۵/۱، ۱۰/۴ میلیون نفر در اقلیم نیمه خشک قرار دارند. این در

حالی است که براساس هر دو شاخص خشکی مورد مطالعه، جمعیت ساکن در مناطق جنوب، شرق و مرکز ایران تحت تأثیر شدت‌های بیشتری از خشکی (اقلیم خشک و خیلی خشک) قرار دارند.

بررسی جمعیت در معرض شدت‌های مختلف خشکی (شاخص DMI) تحت سناریوی اقلیمی SSP2-4.5 حاکی از آن است که در محدوده شمال کشور تعداد جمعیت در معرض اقلیم نیمه‌خشک نسبت به دوره پایه افزایش یافته است. همچنین حدود ۱/۴ میلیون نفر در این محدوده در معرض اقلیم خشک قرار خواهند گرفت، درحالی‌که در دوره پایه، جمعیتی در معرض اقلیم خشک نمی‌باشند. همچنین براساس هر دو شاخص خشکی DMI و EAI تحت سناریوی SSP2-4.5 جمعیت تحت تأثیر شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک در مناطق جنوبی، شرقی و شمالی کشور نسبت به دوره پایه افزایش داشته است. به‌عنوان مثال، با توجه به شاخص خشکی DMI در دوره پایه جمعیت در معرض اقلیم خشک و نیمه‌خشک در مناطق جنوبی، شرقی و مرکزی کشور به ترتیب ۵/۴، ۶/۰ و ۱۹/۴ میلیون نفر می‌باشد، درحالی‌که تحت سناریوی SSP2-4.5 جمعیت در معرض شرایط خشک و نیمه خشک در مناطق خشک به ۶/۶، ۷/۵ و ۲۷/۴ میلیون نفر افزایش داشته است. علاوه بر این براساس شاخص خشکی EAI جمعیت در معرض اقلیم خشک و نیمه‌خشک در مناطق شمال، جنوب و شرق کشور به ترتیب معادل است با ۱۹/۴، ۴/۴ و ۶/۰ میلیون نفر که تحت سناریوی اقلیمی SSP2-4.5 به ۲۷/۴، ۵/۲ و ۷/۵ میلیون نفر افزایش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود علی‌رغم اینکه در مناطق غربی که جمعیت تحت تأثیر شرایط نیمه‌خشک در دوره آینده نسبت به پایه کاهش داشته است، اما جمعیت تحت تأثیر شرایط خشک و خیلی خشک با افزایش همراه می‌باشد. به‌عنوان مثال، با توجه به شاخص DMI جمعیت در معرض شرایط خشک و خیلی خشک در شمال کشور از ۰/۰ (دوره پایه) به ۴/۱ (SSP2-4.5) میلیون نفر و براساس شاخص خشکی EAI از ۴/۳ (دوره پایه) به ۵/۵ (SSP2-4.5) میلیون نفر افزایش یافته است. بررسی نتایج تحت سناریوی اقلیمی SSP5-8.5 نیز حاکی از آن است که جمعیت در معرض شرایط خشک و خیلی خشک با افزایش نسبت به دوره پایه همراه است. این افزایش در مناطق جنوبی، غربی و مرکز کشور با شدت بیشتری همراه می‌باشد. به‌عنوان مثال، براساس طبقه‌بندی خشکی شاخص EAI در دوره پایه به ترتیب ۱۰/۲، ۹/۷ و ۸/۷ میلیون نفر در معرض شرایط اقلیمی خشک و خیلی خشک قرار دارند، درحالی‌که تحت سناریوی SSP5-8.5 میزان جمعیت در معرض شرایط خشک و نیمه‌خشک به ترتیب به ۱۲/۳، ۲۰/۷ و ۱۰/۹ میلیون نفر افزایش یافته است.

همچنین نتایج نشان داد که در دوره پایه استان‌های با بیشترین جمعیت که در معرض شرایط خیلی خشک (برمبنای شاخص DMI) شامل استان‌های کرمان و سیستان و بلوچستان با ۲/۷ و ۲/۴ میلیون نفر جمعیت می‌باشد. همچنین استان‌های با بیشترین جمعیت که طی دوره پایه در شرایط خشک قرار دارند عبارتند از خراسان رضوی، اصفهان و خوزستان با ۶/۰، ۴/۶ و ۴/۴ میلیون نفر جمعیت. تحت سناریوهای اقلیمی SSP2-4.5 و SSP2-4.5 علاوه بر استان‌های کرمان (۳/۶ میلیون نفر) و سیستان و بلوچستان (۳/۷ میلیون نفر)، استان اصفهان نیز با ۵/۵ میلیون نفر جمعیت در شرایط اقلیمی خیلی خشک قرار خواهد گرفت. همچنین علاوه بر استان تهران (۱۵/۱ میلیون نفر)، استان‌های فارس و آذربایجان شرقی نیز به ترتیب با ۵/۲ و ۴/۲ میلیون نفر جمعیت (پیش‌بینی توسط سازمان آمار) از استان‌های با بیشترین جمعیت می‌باشند که در شرایط خشک قرار خواهند گرفت. براساس شاخص خشکی EAI طی دوره پایه استان‌های با بیشترین جمعیت که در شرایط اقلیمی خیلی خشک واقع شده‌اند عبارتند از اصفهان، کرمان و سیستان و بلوچستان و استان‌های واقع در شرایط اقلیمی خشک، خراسان رضوی، فارس، خوزستان و آذربایجان شرقی می‌باشند. تحت سناریوی SSP2-4.5 استان‌های با بیشترین جمعیت و واقع در شرایط خیلی خشک شامل اصفهان، خوزستان، کرمان و سیستان و بلوچستان، استان‌های دارای شرایط اقلیمی خشک از جمله خراسان رضوی، فارس، آذربایجان شرقی و غربی دارای بیشترین جمعیت نسبت به سایر استان‌های می‌باشند.



شکل ۴. جمعیت در معرض طبقات مختلف خشکی براساس شاخص‌های DMI و EAI در دوره پایه و تحت سناریوهای اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در دوره ۲۰۲۵ تا ۲۰۳۶

Figure 4. Population exposed to different aridity classes based on DMI and EAI indices in the base period and under climate scenarios SSP2-4.5 and SSP5-8.5 in the period from 2025 to 2036

نتیجه‌گیری:

با توجه به اهمیت تأثیر تغییر اقلیم بر شرایط خشکی و همچنین جمعیت تحت تأثیر شدت‌های مختلف خشکی، در این مطالعه به ارزیابی تغییر شرایط اقلیمی کشور تحت تأثیر سناریوهای اقلیمی گزارش ششم تغییر اقلیم پرداخته شده است. در این پژوهش برای بررسی تغییرات شرایط اقلیمی از شاخص‌های خشکی De Martonne و Erinç's و همچنین خروجی ۵ مدل اقلیمی شامل: CNRM-CM6-1، CanESM5، GFDL-ESM4، HadGEM3-GC31-LL و MIROC6 استفاده شده است. همچنین اطلاعات جمعیتی ارائه شده توسط سازمان آمار کشور مبنا برای ارزیابی تعداد جمعیت تحت تأثیر شدت‌های مختلف خشکی می‌باشد. نتایج نشان داد که در دوره پایه خروجی‌های اقلیمی از عملکرد قابل قبولی در شبیه‌سازی متغیرهای جوی شامل بارش، متوسط و بیشینه دمای هوا در اکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه برخوردار می‌باشند. نتایج نشان داد که در دوره پایه و مبتنی بر شاخص‌های خشکی DMI و EAI، شرایط اقلیمی در ۲۸ استان کشور نیمه‌خشک، خشک و خیلی خشک می‌باشد. بررسی شرایط اقلیمی تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 حاکی از وجود روند خشک‌تر شدن شرایط اقلیمی در بسیاری از مناطق کشور است. این تغییرات به‌ویژه در مناطق مرکزی، جنوبی، شرقی و شمال‌غربی با شدت بیشتری رخ خواهد داد. همچنین

براساس نتایج مشخص شد که بخش‌های وسیعی از کشور در دوره آینده تحت تأثیر خشکی شدید قرار خواهند گرفت که می‌تواند تأثیرات منفی بر منابع آبی، کشاورزی و زندگی مردم این مناطق داشته باشد. بررسی جمعیت تحت شدت‌های مختلف خشکی طی دوره ۲۰۲۵ تا ۲۰۳۶ نسبت به دوره پایه حاکی از افزایش تعداد جمعیت در معرض خشکی می‌باشد؛ به عنوان مثال، تحت سناریوی SSP5-8.5 و براساس شاخص خشکی EAI میزان جمعیت در معرض شرایط خشک و نیمه‌خشک به ترتیب حدود ۲۰/۶، ۱۱۳/۴ و ۲۵/۳ درصد نسبت به دوره پایه افزایش داشته است. با توجه به رشد جمعیت در مناطق خشک و نیمه خشک، افزایش فشار بر منابع طبیعی و اکوسیستم‌های محلی در این مناطق دور از انتظار نمی‌باشد. این موضوع می‌تواند با چالش‌های اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی جدی در مناطق مذکور همراه شود. بنابراین، پیشنهاد می‌شود که سیاست‌گذاران و مدیران منابع طبیعی به منظور کاهش اثرات منفی ناشی از تغییرات اقلیمی و جلوگیری از بروز مشکلات جدی در آینده، به ارائه برنامه‌ریزی‌های جامعی در زمینه مدیریت منابع آب، توسعه پایدار کشاورزی و ایجاد زیرساخت‌های لازم برای مقابله با تغییرات اقلیمی در مناطق آسیب‌پذیر بپردازند.

مراجع:

- Ahani, H., Kherad, M., Kousari, M. R., Van Roosmalen, L., Aryanfar, R., & Hosseini, S. M. (2013). Nonparametric trend analysis of the aridity index for three large arid and semi-arid basins in Iran. *Theoretical and applied climatology*, 112(3), 553-564. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0747-2>.
- Aven, T., & Renn, O. (2015). An evaluation of the treatment of risk and uncertainties in the IPCC reports on climate change. *Risk Analysis*, 35(4), 701-712. <https://doi.org/10.1111/risa.12298>
- Azadmanesh, R., & RezaZade, M. (2020). *Detection of Drought Changes Trend Based on De Martonne and Pinna aridity indexes in Southeast Iran*. University of Hormozgan. [In Persian]. <https://ganj.irandoc.ac.ir/viewer/2fd319880e5cfe3d38dd5a4e17bc4316?sample=1>.
- Cao, L., & Zhou, Z. (2019). Variations of the Reference Evapotranspiration and Aridity Index Over Northeast China: Changing Properties and Possible Causes. *Journal of Advances in Meteorology*. <https://doi.org/10.1155/2019/7692871>.
- De Martonne, E. (1926). Aerisme, et Indices d'aridite. *Comptes Rendus de L'Academy of Science*, 182, 1395-1398. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1180607>.
- Erinç, S. (1965). *An Attempt on Precipitation Efficiency and A New Index*. Istanbul University Institute Release: Baha Press.
- Fathi, E. (2020). A look at the past, present and future of Iran's population. *Statistics Research Institute*. [In Persian]. <https://civilica.com/doc/1718940/>.
- Haile, G. G., Tang, Q., Hosseini Moghari, S. M., Liu, X., Gebremicael, T. G., Leng, G., & Yun, X. (2020). Projected impacts of climate change on drought patterns over East Africa. *Earth's Future*, 8(7), 1-23. <https://doi.org/10.1029/2020EF001502>
- Hosseini, M., & Azizian, A. (2022). Studying the Effect of Climate Change on Drought Conditions and Climate Regions of Iran Using Aridity Index. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 13(1), 111-129. [In Persian]. <https://doi.org/10.30495/wsrcj.2023.71949.11357>
- Jiang, H., Yu, Y., Chen, M. M., & Huang, W. (2021). The climate change vulnerability of China: spatial evolution and driving factors. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(29):39757-39768. <https://doi.org/10.1007/s11852-012-0180-9>.
- Kaviani, M., & Alijani, B. (2011). Basics of water and meteorology. *Samt Press*. [In Persian]. <https://samta.samt.ac.ir/product/9117/>.
- McCarthy, J., Canziani, O., Leary, N., Dokken, D., & White, K. (2001). *Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGII_TAR_full_report-2.pdf.
- Mirgol, B., Nazari, M., Etedali, H. R., & Zamanian, K. (2021). Past and future drought trends, duration, and frequency in the semi- arid Urmia Lake Basin under a changing climate. *Meteorological Applications*, 28(4), 1-19. <https://doi.org/10.1002/met.2009>
- Norozi, E., Rostami, N., & Jahangir, M. (2018). Prediction of drought condition during 2018-2037 period under Climate Change Approach (Case study: Ilam and Dehloran Stations). *Iranian Journal*

- of *ECO Hydrology*, 5(3), 977–991. [In Persian]. <https://doi.org/10.22059/IJE.2018.256186.866>.
- Nouri, M., Homae, M., & Bannayan, M. (2016). Assessing Trends of aridity index changes over 1966-2100 period in the Northwest of Iran. *Watershed Engineering and Management*, 8(4), 439–453. [In Persian]. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2016.107187>.
- O'Brien, K., Leichenko, R., Kelkar, U., Venema, H., Aandahl, G., Tompkins, H., Javed, A., Bhadwal, S., Barg, S., Nygaard, L., & West, J. (2004). Mapping vulnerability to multiple stressors: climate change and globalization in India. *Global Environmental Change*, 14(303–313). <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2004.01.001>.
- O'Neill, B. C., Kriegl, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., van Ruijven, B. J., van Vuuren, D. P., Birkmann, J., Kok, K., Levy, M., & Solecki, W. (2017). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, 42, 169–180. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004>
- Philip, G., Babatunde, J., & Gunner, L. (2017). Impacts of Climate Change on Hydro-meteorological Drought over the Volta Basin, West Africa. *Global and Planetary Change*, 155, 121–132. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.07.003>.
- Raziei, T., Shokoochi, A., Saghafian, B., & Daneshkar Arasteh, P. (2003). Monitoring the drought in central Iran using the SPI index. *The 3th Regional Climate Conference of Isfahan University*, 11. [In Persian]. <https://sid.ir/paper/487318/fa>.
- Rogelj, J., Popp, A., Calvin, K. V., Luderer, G., Emmerling, J., Gernaat, D., Fujimori, S., Strefler, J., Hasegawa, T., Marangoni, G., Krey, V., Kriegl, E., Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Doelman, J., Drouet, L., Edmonds, J., Fricko, O., Harmsen, M., Tavoni, M. (2018). Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5 °C. *Nature Climate Change*, 8(4), 325–332. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0091-3>
- SalehpourJam, A., Tabatabaei, M., Sarreshtehdari, A., & Mosaffaie, J. (2019). Investigation of drought characteristics in north-west of Iran using Deciles Index. *Watershed Engineering and Management*, 10(4), 552–563. [In Persian]. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2018.115672.1360>
- Sarlak, N., & Agha, O. (2018). Spatial and temporal variations of aridity indices in Iraq. *Journal of Theoretical and Applied Climatology*, 133, 89–99. <https://doi.org/10.1007 / s00704-017-2163-0>
- Shelton, M. (2018). Hydroclimatology perspectives and applications. *Cambridge University Press*, 438p.
- Wade, A. A., Hand, B. K., Kovach, R. P., Luikart, G. Whited, D. C., & Muhlfeld, C. C. (2017). Accounting for adaptive capacity and uncertainty in assessments of species' climate-change vulnerability. *Conservation biology*, 31(1), 136–149. <https://doi.org/10.1111/cobi.12764>.
- Xia, H., Zhuang, J., & Yu, D. (2013). Combining crowding estimation in objective and decision space with multiple selection and search strategies for multi-objective evolutionary optimization. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 44(3). <https://doi.org/10.1109/TCYB.2013.2256418>.
- Zhang, Q., Li, J., Singh, V. P., & Bai, Y. (2012). SPI-based evaluation of drought events in Xinjiang , China. *Natural hazards* 64, 481–492. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0251-0>.